

УДК 535.317

Шавкутенко Е. Н., Мильдер О. Б.

УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

ЧТО ТАКОЕ «МЕГАЛУЧ»?

Аннотация

Пленоптическая фотография является одной из технологий компьютерной фотографии. Параметр, определяющий разрешение подобных камер, в русскоязычной литературе именуется «мегалуч». В работе обсуждается происхождение и смысл данного термина, дается его численная оценка и связь с устоявшимся термином «пиксел». На примере пленоптической камеры *Lytro LF* сделана попытка подсчитать фактическое число мегалучей, которое фиксирует камера.

Ключевые слова: камера светового поля, пленоптическая камера, световое поле, световые лучи, мегалуч.

Shavkutenko E. N., Milder O. B.

UrFU, Ekaterinburg, Russia

WHAT'S THE MEGARAY?

Abstract

Plenoptic photography is one of the computational photography technologies. Parameter called «megaray» determines the resolution of such cameras. The origin and meaning of the term are discussed in present paper. Numerical evaluation and relation to an existed term «pixel» is given. In addition, on the example of Lytro LF camera it has attempted to estimate the actual number of rays captured by Light-field camera.

Keywords: light field camera, plenoptic camera, light field, light rays, megaray.

Введение

Выпуск компанией *Lytro* [1; 2] потребительской камеры светового поля (синоним — пленоптическая камера) *Lytro Light Field*

Camera (Lytro LF) послужил причиной всплеска интереса к технологии цифровой регистрации световых полей. В первых же обзорах, посвященных данному продукту, было заявлено: «Поскольку камера захватывает световые лучи, а не пиксели, ее сенсор регистрирует «11 мегалучей» (11 миллионов лучей) вместо пикселей» [3].

В данной работе предпринимается попытка разобраться в смысле термина «мегалуч», придать ему численное наполнение и связать с привычным понятием «пиксел».

1. Теория и расчет

Понятие «светового луча» впервые введено А. А. Гершуном в фундаментальной работе «Световое поле» [4]. Работа переведена на многие языки и является теоретической основой современной фотометрии.

Согласно Гершуну: «... мы станем оперировать прямолинейно распространяющимся (в однородной среде) лучом, на который низана лучистая энергия. Это будет чистая геометрия плюс привнесенное в нее понятие об энергии» [4]. Математически, для каждой точки пространства луч определяется как совокупность величин вектора телесного угла и освещенности в данной точке в направлении вектора телесного угла. Положение вектора телесного угла совпадает с осью элементарного конуса и направлено в сторону вершины. Позже совокупность этих величин трансформировалась в понятие «пленоптической функции» для исследований в области компьютерной фотографии.

М. Levoу [5] показал, что для описания пленоптической функции (т. е. «луча») достаточно четырех координат в двух параллельных опорных плоскостях в терминах гауссовой оптики.

Рассмотрим общую конструкцию пленоптической камеры (рис. 1): 1 — эквивалент основной оптики объектива камеры, выбираемый в качестве первой опорной плоскости; 2 — массив микролинз, выбираемый в качестве второй опорной плоскости и расположенный таким образом, что светочувствительный элемент камеры (основная матрица) оказывается в фокальной плоскости массива микролинз; 3 — основная матрица.

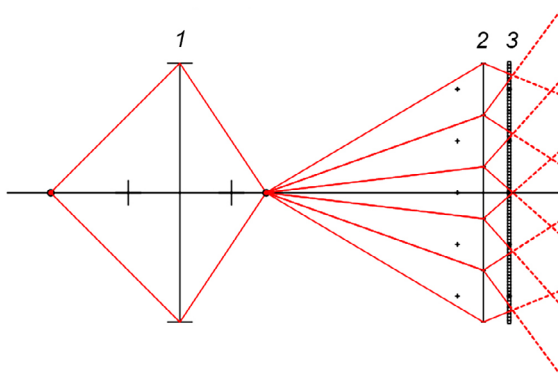


Рис. 1. Конструкция пленоптической камеры и схема прохождения лучей [6]

Таким образом, применительно к пленоптической фотографии, термин «луч» можно определить как количество световой энергии, пришедшей из заданной точки изображаемого пространства по заданному направлению, зарегистрированное в пределах одного пиксела основной матрицы камеры.

На основании представлений о «луче» в рамках теории светового поля можно предложить формулу для вычисления количества «мегалучей» потребительской пленоптической системы. В первом приближении, количество R -лучей (мегалучей) можно оценить как:

$$R = N \times C, \quad (1)$$

где N — количество микролинз в массиве; C — среднее количество пикселей матрицы, покрываемых одной микролинзой.

Очевидно, что в идеальном варианте количество лучей, регистрируемых пленоптической камерой, совпадает с числом пикселей ее основной матрицы. Однако для более корректной оценки числа R -лучей необходимо учесть пиксели матрицы, приходящиеся на границы микролинз и, следовательно, не участвующие в формировании изображения.

Предположим, что микролинзы в массиве упакованы в гексагональную («сотовую») структуру — такая плоская структура будет являться наиболее плотноупакованной. Предположение соответствует действительности — именно так поступают производители массивов

микролинз [7].

Для удобства расчетов допустим, что микролинза является окружностью, вписанной в шестиугольную «соту». Расстояние между оптическими центрами соседних микролинз численно задается параметром $pitch$ («шаг»). Тогда получим

$$p = 2r,$$

где r — радиус микролинзы, p — $pitch$. Площадь «соты», как площадь правильного шестиугольника:

$$S_6 = 6r^2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad \alpha = \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ - \text{центральный угол правильного}$$

шестиугольника.

Пиксел регистрирующей матрицы камеры является квадратным и задается своим линейным размером a . Тогда параметр C , входящий в формулу (1), может быть предварительно оценен как отношение площади шестиугольной «соты» к площади пиксела матрицы:

$$C = \frac{S_6}{a^2} = \frac{2\sqrt{3} \cdot r^2}{a^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{p}{a}\right)^2. \quad (2)$$

Условно назовем пикселы основной матрицы, попадающие на границы микролинз «темными». Для того, чтобы оценить их количество, необходимо определить количество границ, принадлежащих одной «соте». У каждого узла в плоской гексагональной структуре шесть ближайших соседей. Ячейкой Вигнера-Зейтца для такой структуры будет являться также шестиугольник, только вдвое меньших линейных размеров. Следовательно, каждой «соте» принадлежит ровно половина ее границ, т. е. половина периметра правильного шестиугольника. Таким образом, параметр C должен быть уменьшен на величину C_T , равную отношению полупериметра правильного шестиугольника к линейному размеру пиксела основной матрицы. Будучи выраженной через введенные параметры, эта величина составит:

$$C_T = \frac{\sqrt{3} \cdot p}{a},$$

где в числителе дроби — полупериметр правильного шестиугольника, выраженный через параметр $pitch$. Другими словами, структу-

рой, составленной из квадратов (рис. 2), можно заполнить все пограничное «межсотовое» пространство без перекрытия, используя оператор трансляции.

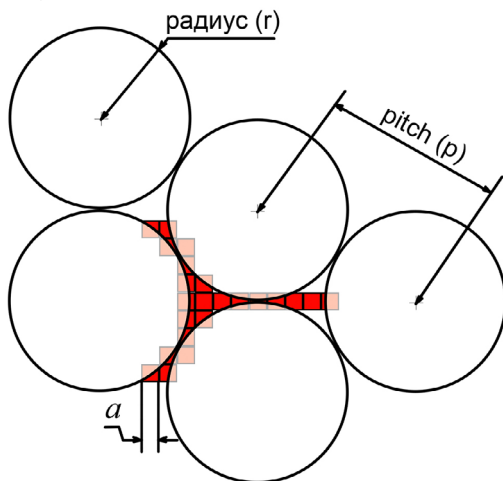


Рис. 2. Схематичное изображение пикселей основной матрицы пленоптической камеры, приходящихся на границы микролинз

Число пикселей основной матрицы камеры, укрываемых одной микролинзой и действительно (!) участвующих в формировании изображения составит:

$$\tilde{C} = C - C_T = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{p}{a} \right)^2 - \sqrt{3} \frac{p}{a}.$$

Формула (1) для вычисления действительного числа лучей пленоптической камеры примет вид:

$$R = \sqrt{3} N \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{p}{a} \right)^2 - \frac{p}{a} \right), \quad (3)$$

а относительная доля «темных» пикселей:

$$D = \frac{NC_T}{NC} = \frac{C_T}{C} = \frac{a}{2p}. \quad (4)$$

Таким образом, доля «темных» пикселей оказывается пропорциональной соотношению линейных размеров пиксела основной матрицы и характерного размера, определяющего способ упаковки микролинз в массив.

2. Оборудование и программное обеспечение

Изображение объекта (головоломка *NeoCube*) регистрировалось в одинаковых условиях двумя камерами: цифровой зеркальной камерой *Pentax K-5 II* и камерой светового поля *Lytro LF*. Использовалась студийная вспышка *Hensel Expert Pro 503*. Был получен ряд изображений с различными световыми экспозициями области объекта от 640 до 19500 лк·с. Для анализа были выбраны изображения с обеих камер, соответствующие световой экспозиции 1950 лк·с. Экспозиция измерялась спектрофотометром *i1 Pro* с использованием свободного программного обеспечения *ArgyllCMS*.

Камера обладает следующими техническими характеристиками: количество микролинз в массиве ($N = 129100$), *pitch* — ($p = 13,89$ мкм), упаковка микролинз в массиве (гексагональная), линейный размер пиксела основной матрицы ($a = 1,4$ мкм). Таким образом, количество лучей, регистрируемых данной камерой, вычисленное с применением формул (1) и (2) составляет:

$$R = \frac{\sqrt{3}}{2} N \left(\frac{p}{a} \right)^2 \cong 1,10 \times 10^7.$$

Полученное значение соответствует заявляемому производителем параметру «11 мегалучей».

Обработка изображений осуществлялась в пакете *Adobe Photoshop CC*, математическая обработка результатов — в пакетах *MicroSoft Excel*, *MatLab*. Специальная обработка изображений камеры светового поля осуществлялась с помощью свободно распространяемого программного обеспечения *Lytro Compatible* [8].

3. Результаты и обсуждение

Расшифрованные изображения с матриц обеих камер в формате *JPG* загружались в *Photoshop*, где из каждого изображения вырезался кусок нейтрального фона размером 500×500 пикселей (рис. 3).

1. Моделирование процессов восприятия текстовой и графической информации

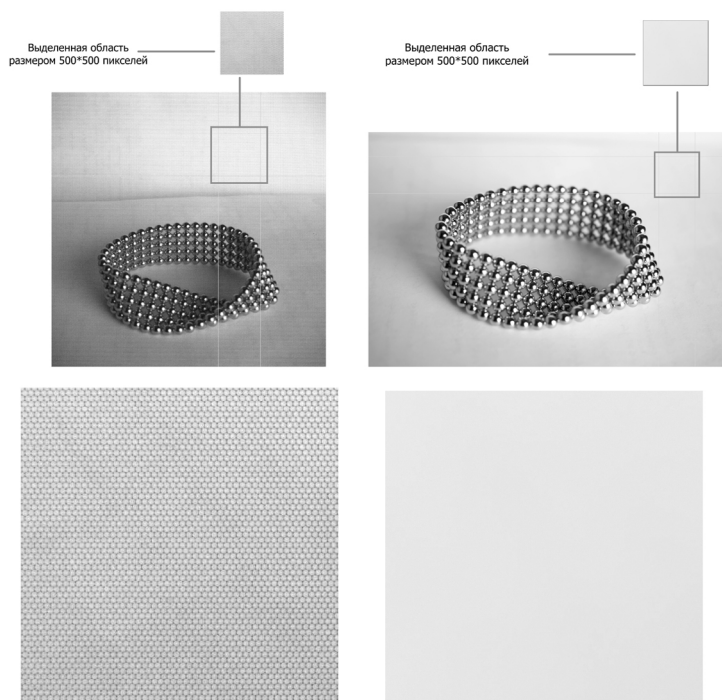


Рис. 3. Расшифрованные изображения с матриц (верх) и выделенные фрагменты (низ) камер *Lytro LF* (слева) и *Pentax K-5 II* (справа)

Фрагменты преобразовывались в пространство *Lab* и сохранялись в формате *TIFF*. *TIFF*-файлы загружались в *MatLab*, где для анализа в виде отдельной переменной выделялся только яркостный канал (*L*). Таким образом, выбор участка фона в качестве фрагмента не случаен — этот участок сцены наиболее ровно освещен, т. е. не должен иметь в яркостном канале значительных флуктуаций.

На рис. 4 приведена диаграмма распределения яркости по пикселям во фрагменте изображения, полученном с пленочной камеры (показана часть изображения размером 30×100 пикселей). Более светлые участки соответствуют более высокой яркости. По характеру

распределения яркости легко угадываются места расположения микролинз массива и границы между микролинзами (сравни с рис. 2).

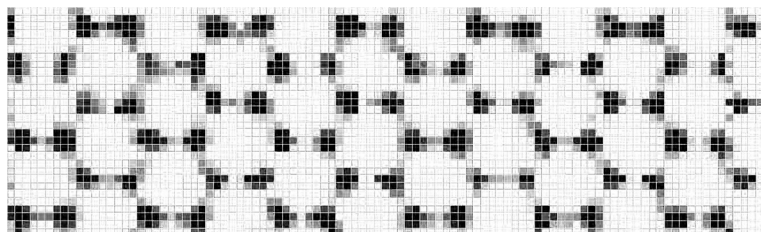


Рис. 4

В программе *MatLab* был написан специальный скрипт, который высчитывал долю пикселей, имеющих уровень яркости ниже задаваемого критического значения. Результаты расчетов для фрагмента изображения, полученного с пленоптической камеры, приведены в табл.

Таблица

Доля «темных» пикселей для различных критических значений яркости

Критический уровень яркости, L	D , %
60	1,0
65	4,0
70	10,6
75	22,1

На рис. 5 приведены сравнительные диаграммы распределения яркостей по пикселям в случайно выбранной строке фрагментов изображений, полученных с обеих камер. В соответствии с данными диаграммы (рис. 5) в качестве критического уровня выбирался диапазон 65–70. Как видно из данных табл., такому диапазону критических яркостей соответствует от 4 до 10 % «темных» пикселей. Расчет доли «темных» пикселей по формуле (4) дает значение 5,04 %.

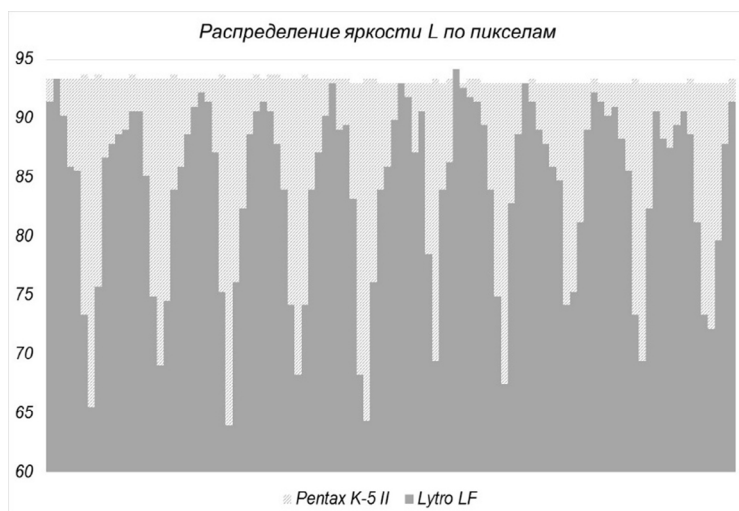


Рис. 5. Распределение яркости

Можно указать несколько причин выбора уровня яркости 65–70 в качестве критического:

1. Точка перегиба гистограммы распределения яркости в выбранном фрагменте соответствует этому диапазону.

2. С помощью *Lytro Compatible* было восстановлено мультиизображение объекта (рис. 6) и средствами *Photoshop* измерен уровень яркости в каждом из изображений в районе выделенного фрагмента. Яркость выделенной области в самых темных изображениях также колеблется в районе 65–70.

Выводы

1. Термин «луч», используемый в пленоптической фотографии, означает количество световой энергии, пришедшей из заданной точки изображаемого пространства по заданному направлению и зарегистрированной в пределах одного пиксела основной матрицы камеры.

2. Число лучей (мегалучей), указываемое производителями пленоптических камер, на самом деле означает количество пикселей основной матрицы камеры, эффективно укрываемое массивом микролинз.

3. Реальное количество лучей, участвующее в формировании изображения, меньше на величину, пропорциональную соотношению

линейных размеров пиксела основной матрицы и микролинзы. Коэффициент пропорциональности зависит от способа упаковки микролинз в массив.

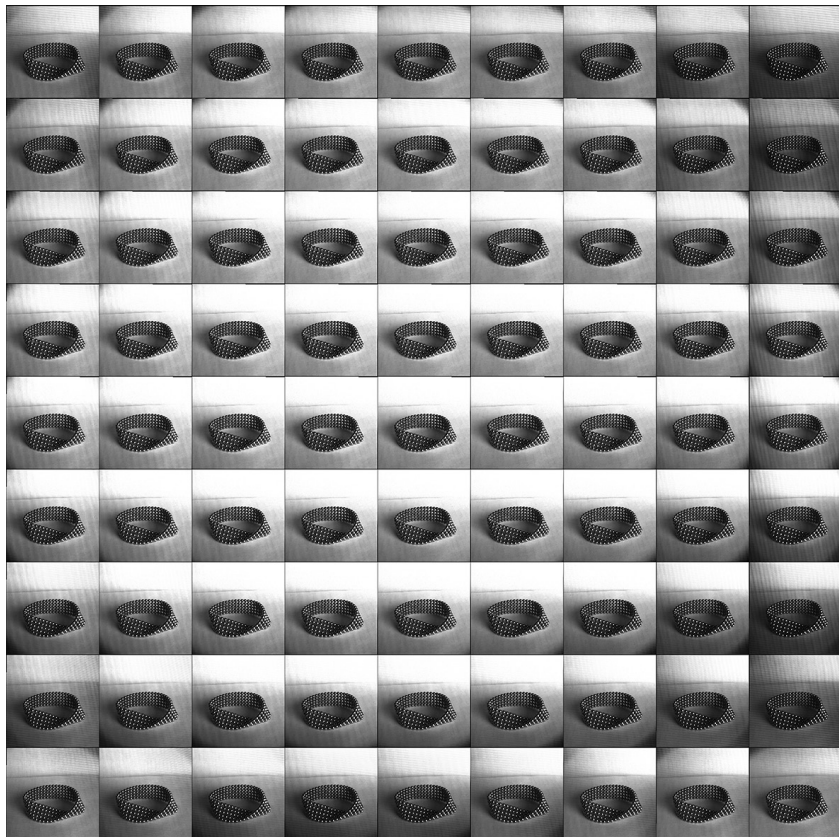


Рис. 6. Мультиизображение с камеры *Lytro LF*,
восстановленное средствами *Lytro Compatible*

Список литературы

1. LYTRO, Inc. URL: <https://www.lytro.com> (дата обращения: 28.02.15).
2. Ng, R. Digital Light Field Photography // Stanford University. 2006.
3. O'Connell, F. Inside the Lytro. URL: <http://www.nytimes.com/interactive/2012/03/01/business/inside-the-lytro.html> (дата обращения: 28.02.15).
4. Гершун А. А. // Избранные труды по фотометрии и светотехнике. Физматгиз. 1958.
5. Levoy M., Hanrahan P. 1996. Light field rendering // In Siggraph'96. P. 31–42.
6. Kuřera J. Computational photography of light-field camera and application to panoramic photography // Institute of Information Theory and Automation. 2014.
7. Фирмы-производители массивов микролинз. URL: <http://lightfield-forum.com/forum/?mingleforumaction=viewtopic&t=34> (дата обращения: 28.02.15).
8. Lytro Compatible Communicator v1.0.1.2. URL: <http://lightfield-forum.com/download/28/> (дата обращения: 28.02.15).